

Małgorzata Łatuszyńska, Mariusz Borawski

Uniwersytet Szczeciński, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny

ZASTOSOWANIE OBIEKTÓW ABSTRAKCYJNYCH W WIELOAGENTOWEJ SYMULACJI KOMPUTEROWEJ

Streszczenie: W artykule przybliżono ideę obiektów abstrakcyjnych w kontekście możliwości zastosowania jej w symulacji wieloagentowej do odwzorowania zachowań agentów zależnych od czynników losowych. Ponadto przedstawiono wieloagentowy model ruchu drogowego, w którym w opisie agentów użyto obiekty abstrakcyjne. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów uzasadniają przydatność prezentowanej koncepcji.

Słowa kluczowe: symulacja komputerowa, system wieloagentowy, obiekty abstrakcyjne.

1. Wstęp

Symulacja komputerowa jest metodą służącą do imitowania działania całego systemu lub też tylko naśladowania pewnej sytuacji poprzez użycie programów komputerowych¹. Służy do badania i projektowania systemów, które są z natury złożone, dynamiczne i stochastyczne. Symulację komputerową przeprowadza się zarówno w celu lepszego zrozumienia działania systemu, jak i prognozowania jego przyszłych stanów. Informacje generowane w trakcie eksperymentów symulacyjnych wspierają w istotny sposób proces podejmowania taktycznych i strategicznych decyzji dotyczących istniejących systemów lub takich, które mają dopiero powstać.

Obiektem, którym manipuluje się w trakcie badań symulacyjnych, jest model. Jest to pojęcie bardzo ogólne, oznacza reprezentację danego systemu w postaci innej niż w rzeczywistości. Pragmatyczna definicja modelu mówi, że: „jest to narzędzie, za pomocą którego można opisać system i jego zachowanie się w różnych warunkach zewnętrznych” [Findeisen 1985, s. 303]. W badaniach systemów stosuje się różnego rodzaju modele². W symulacji największe znaczenie, rzecz jasna, mają modele matematyczne, które opisują rzeczywistość za pomocą równań, nierówności matematycznych, związków logicznych itp.

¹ Zob. przegląd definicji symulacji komputerowej np. w: [Łatuszyńska 2008, s. 23].

² Zob. liczne przekroje klasyfikacyjne w literaturze, np.: [Gordon 1974, s. 24-30; Fishman 1981, s. 24-25; Findeisen 1985, s. 303-324].

Istnieje wiele typów symulacji komputerowej³. Jednym z nich jest symulacja agentowa (*agent-based simulation*), znana w literaturze przedmiotu również pod nazwą symulacji wieloagentowej (*multi-agent simulation*)⁴. Chociaż symulacja komputerowa jako metoda badawcza jest stosowana szeroko od lat 60. ubiegłego stulecia, to symulacja wieloagentowa jest znana stosunkowo niedawno, bo od lat 90. Obecnie jednak jest już dobrze ukształtowanym symulacyjnym narzędziem badania różnych systemów, stosowanym zarówno w nauce, jak i w praktyce⁵. Zastosowania symulacji wieloagentowej są wielorakie, między innymi do badania systemów ekonomicznych⁶, społecznych⁷, transportowych⁸, biologicznych⁹ i innych¹⁰. Przykładowe obszary zastosowań modeli wieloagentowych przedstawia tab. 1.

Tabela 1. Przykłady zastosowań symulacji wieloagentowej

| | |
|---------------------------|-------------------------------------|
| Organizacja i zarządzanie | Systemy społeczne |
| – procesy produkcyjne | – antyczne cywilizacje |
| – łańcuchy logistyczne | – wykroczenia społeczne |
| – ubezpieczenia | – społeczne determinanty terroryzmu |
| Ekonomia | – sieci organizacyjne |
| – rynki finansowe | Systemy wojskowe |
| – sieci handlowe | – dowodzenie i kontrolowanie |
| – zachowanie konsumentów | – eskalacja zbrojeń |
| Infrastruktura | – symulacja wojen |
| – systemy transportowe | Biologia |
| – sieci wodociągowe | – dynamika populacji |
| Tłum | – sieci ekologiczne |
| – ruch pieszych | – zachowanie stad |
| – modelowanie ewakuacji | – zachowanie komórek |

Źródło: opracowanie na podstawie: [Macal, North 2006, s. 73-83].

³ Przegląd typów symulacji komputerowej znajduje się między innymi w: [Gilbert, Troitzsch 2005; Zeigler 1984; Gordon 1974].

⁴ Opis tego typu symulacji znajduje się w wielu publikacjach, między innymi w: [Dávila, Uzcátegui, Tucci 2005, s. 285-290; Dávila, Tucci 2000; Federici, Redaelli, Vizzari 2006; Ferber 1999; Epstein, Axtell 1996]. Porównanie symulacji agentowej z innymi typami symulacji w: [Davidsson 2000; Macal, North 2006, s. 73-83].

⁵ Syntetyczny przegląd zastosowań symulacji wieloagentowej w różnych dziedzinach zaprezentowano między innymi w: [Siebers i in. 2007, s. 554-564; Bonabeau 2002, s. 7280-7287; Macal, North 2006].

⁶ Przykłady aplikacji między innymi w: [Siebers i in. 2008, s. 25-4; Situngkir, Surya 2004; Siebers i in. 2007, s. 959-966; Barber i in. 1998].

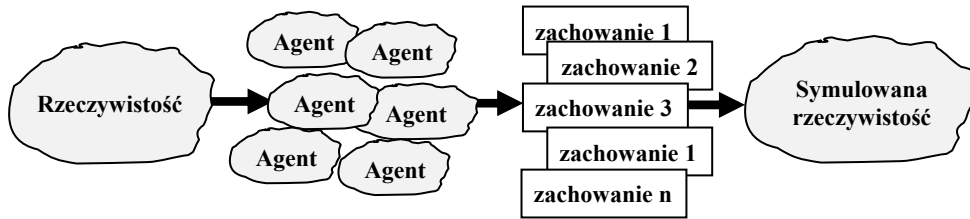
⁷ Przykładowo: [Gilbert, Troitzsch 2005, s. 172-216; Pan i in., s. 113-132].

⁸ Przykłady zastosowań między innymi w: [Kesting i in. 2008; Beuck, Rieser, Nagel 2006; Fernandes, Nunes 2008; Tornquist, Davidsson 2002; Cicortas, Somosi 2005; El Hadouajl i in. 2004, s. 20-25; Vogel, Nagel 2005; Hallé, Laumonier, Chaib-draa 2004; Li i in. 2006; Dresner, Stone 2005, s. 471-477; Eichler i in. 2005, s. 507-510; Avila i in. 2005].

⁹ Przykładowo: [Bourjot, Chevrier 2001; Dimou i in. 2006; Amigoni, Schiaffonati 2007, s. 179-191; Drogonoul, Ferber 1992, s. 3-23].

¹⁰ [Gonçalves, Rodrigues, Correia 2004; Frank, Bittner, Raubal 2001, s. 124-139].

W symulacji wieloagentowej system jest modelowany jako zbiór autonomicznych jednostek, zwanych agentami. W modelu wieloagentowym opisuje się procesy decyzyjne w mikroskali, dla każdego agenta z osobna. Z połączenia działań wielu agentów i ich interakcji ze sobą nawzajem i ze środowiskiem, w którym funkcjonują, powstaje obraz badanego systemu w makroskali (rys. 1) [Siebers, Aickelin 2008, s. 554-556].



Rys. 1. Istota symulacji wieloagentowej

Źródło: opracowanie na podstawie [Drogoul, Ferber 1992, s. 3-23].

Różne dyscypliny wypracowały swoje własne sposoby pojmowania terminu „agent”. Powszechnie akceptuje się, że agenty są umiejscowione w pewnym środowisku i są zdolne do podejmowania autonomicznych akcji¹¹. Niektórzy autorzy uważają, że agentem jest każdy typ niezależnych komponentów (program komputerowy, model, jednostka itd.) [Bonabeau 2002, s. 7280-7287], przy czym zachowanie niezależnego komponentu może być opisywane w różny sposób, od prymitywnych reguł decyzyjnych po bardzo skomplikowane adaptacyjne reguły sztucznej inteligencji. Inni utrzymują, że zachowanie niezależnego komponentu musi być adaptacyjne, aby mógł być nazwany agentem. Miano agenta jest zarezerwowane dla komponentów, które w pewnym sensie uczą się swojego środowiska i na skutek tego uczenia zmieniają swoje zachowanie. J. Casti [1997] argumentuje, że agent powinien zawierać zarówno reguły niższego rzędu, opisujące zachowanie, jak i zbiór reguł wyższego rzędu, determinujących zasady zmiany reguł. Reguły niższego rzędu opisują reakcję na środowisko, natomiast reguły wyższego rzędu opisują zasady adaptacji.

Z praktycznego punktu widzenia można założyć, że agent posiada następujące cechy [Macal, North 2006, s. 73-74]:

- jest identyfikowalną jednostką posiadającą pewien zbiór cech i reguł zarządzających jej zachowaniem się i możliwościami decyzyjnymi,
- jest umiejscowiony w środowisku, w którym współdziała z innymi agentami,
- jego działanie może być skierowane na osiągnięcie określonego celu,

¹¹ Por.: [Bieniasz 2006, s. 13-14; Wooldridge 1999, s. 27-77; Wooldridge 2002; Frank, Bittner, Raubal 2001, s. 124-139].

- jest autonomiczny, może funkcjonować niezależnie w swoim środowisku i w kontaktach z innymi agentami, przynajmniej w zakresie pewnych zdefiniowanych sytuacji,
- jest elastyczny, posiada zdolność do uczenia się i adaptacji.

W symulacji wieloagentowej, w której odwzorowuje się jednostki podlegające czynnikom losowym, pojawia się problem z odzwierciedleniem ich zachowania. Przykładowo, w tych samych sytuacjach, w takich samych warunkach zewnętrznych, ten sam człowiek może zachowywać się w różny sposób, w zależności od jego samopoczucia, na które wpływają między innymi takie czynniki, jak: przepracowanie, brak snu i/lub wypoczynku, stres, choroba. Problem ten można rozwiązać poprzez losowanie czynników wpływających na zachowanie agentów. Tego rodzaju rozwiązanie ma jednak istotną wadę. W celu wiarygodnego wyznaczenia statystyki zachowania się agentów konieczne jest, aby badane zdarzenie było wiele razy odwzorowane w modelu z udziałem agentów o podobnych własnościach. Związane jest z tym znaczne zwielokrotnienie liczby agentów biorących udział w symulacji, a tym samym wydłuża się istotnie czas obliczeń.

Alternatywnym rozwiązaniem może być włączenie do opisu agentów tzw. obiektów abstrakcyjnych, które pozwalają na odwzorowanie zachowań zależnych od czynników losowych za pomocą jednego komponentu, zastępującego wiele agentów. Dzięki temu symulacja jednego zdarzenia może być wystarczająca do wyznaczenia statystyki zachowania się wielu agentów, w ramach danego typu zdarzenia, z jednakowo dobrą wiarygodnością, jak w przypadku symulacji ze znacznie większą liczbą agentów.

W artykule przybliżono ideę obiektów abstrakcyjnych w kontekście możliwości zastosowania jej w symulacji wieloagentowej w celu odwzorowania zachowań agentów zależnych od czynników losowych, do czego posłużono się przykładowym modelem systemu transportowego.

2. Obiekty abstrakcyjne

Obiekt abstrakcyjny należy utożsamiać ze złożoną formą liczby, która składa się z kilku elementów, przy czym jeden z nich może odnosić się do czynnika losowego. Czynniki losowe powinny być w symulacji wieloagentowej odpowiednio opisane, w najprostszym przypadku za pomocą wariancji lub odchylenia standardowego. Wariancji – czy odchyleniu standardowemu – zwykle towarzyszy wartość przeciętna. Razem tworzą zbiór ważnych parametrów opisujących rozkład, dla którego można zdefiniować działania arytmetyczne. Wymaga to jednak czysto teoretycznego dopuszczenia możliwości istnienia ujemnych wartości wariancji. Aby podkreślić, że mamy do czynienia z wariancją mogąą przyjmować ujemne wartości, wariancję taką określa się mianem pseudowariancji [Borawski 2008, s. 71-85].

Z punktu widzenia działań arytmetycznych wariancja i odchylenie standardowe opisują różne powiązania między zmiennymi. Wariancja opisuje przypadek arytmety-

tyki między zmiennymi losowymi niezależnymi, a odchylenie standardowe – między zmiennymi losowymi „całkowicie od siebie zależnymi”. Podobnie jak w przypadku wariancji, dla odchylenia standardowego również można dopuścić ujemne wartości. Mówimy wówczas o pseudoodchyleniu standardowym. Ponieważ obie pary wartości, wartość przeciętna – pseudowariancja i wartość przeciętna – pseudoodchylenie standardowe, opisują skrajne przypadki zachowania się czynnika losowego, można je połączyć w trójkę uporządkowaną AO , zwaną obiektem abstrakcyjnym:

$$AO = (\bar{x}, \tilde{\sigma}, \tilde{\sigma}^2), \quad (1)$$

gdzie: AO – obiekt abstrakcyjny,

\bar{x} – wartość średnia parametru,

$\tilde{\sigma}$ – pseudoodchylenie standardowe,

$\tilde{\sigma}^2$ – pseudowariancja.

Na takim obiekcie można zdefiniować działania arytmetyczne, tj.

– dodawanie:

$$AO_1 + AO_2 = (\bar{x}_1, \tilde{\sigma}_1, \tilde{\sigma}_1^2) + (\bar{x}_2, \tilde{\sigma}_2, \tilde{\sigma}_2^2) = (\bar{x}_1 + \bar{x}_2, \tilde{\sigma}_1 + \tilde{\sigma}_2, \tilde{\sigma}_1^2 + \tilde{\sigma}_2^2), \quad (2)$$

– mnożenie przez element zbioru liczb rzeczywistych:

$$a \cdot AO = a \cdot (\bar{x}, \tilde{\sigma}, \tilde{\sigma}^2) = (a\bar{x}, a\tilde{\sigma}, a\tilde{\sigma}^2), \quad (3)$$

gdzie a to wartość ze zbioru liczb rzeczywistych.

– odejmowanie można zdefiniować w oparciu o element przeciwny:

$$-AO = -(\bar{x}, \tilde{\sigma}, \tilde{\sigma}^2) = (-\bar{x}, -\tilde{\sigma}, -\tilde{\sigma}^2). \quad (4)$$

Pewne cechy z indeksem ch opisane za pomocą obiektów abstrakcyjnych mogą zależeć od kilku innych obiektów abstrakcyjnych:

$$AO_{ch} = f(AO_1, AO_2, \dots, AO_n), \quad (5)$$

Jeżeli jest potrzeba wyznaczenia wartości obiektu abstrakcyjnego z indeksem ch , to można ją wyliczyć na podstawie znajomości pewnej funkcji przekształcającej. Przykładowo może to być wyrażone wzorem:

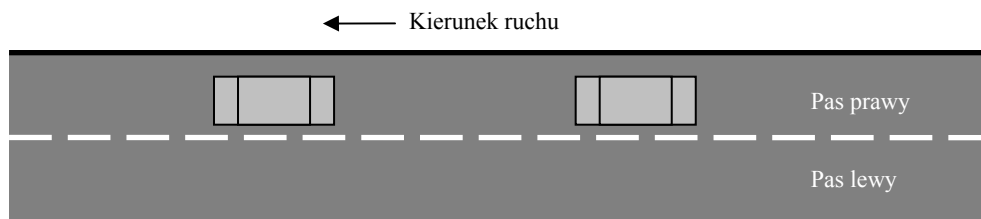
$$AO_{ch} = a_1 AO_1 + \frac{a_2 AO_2 + a_3 AO_2}{b}. \quad (6)$$

Obiekt abstrakcyjny określa parametry rozkładu badanej cechy agenta. Do symulacji wieloagentowej potrzebne są konkretne wartości cechy, a nie parametry jej rozkładu. Zatem istnieje konieczność wyznaczenia tej konkretnej wartości. Przejście z obiektu abstrakcyjnego na konkretną wartość badanej cechy odbywa się poprzez wyznaczenie liczby określającej cechę na podstawie znajomości parametrów $\bar{x}_1, \tilde{\sigma}_1, \tilde{\sigma}_1^2$, czyli przez losowanie.

Obiekt abstrakcyjny zastępuje liczbę w opisie agenta, zatem implementacja obiektu abstrakcyjnego do opisu agenta polega na zamianie opisu cechy wyrażonego za pomocą jednej liczby na trójkę uporządkowaną (równanie 1). Praktycznie we współczesnych kompilatorach polega to na zastąpieniu typu rzeczywistego zmiennej, przez klasę będącą obiektem abstrakcyjnym z przeciążonymi operatorami dodawania, odejmowania, mnożenia i dzielenia¹².

3. Symulacja wieloagentowa ruchu drogowego z użyciem obiektów abstrakcyjnych

W celu zilustrowania możliwości użycia koncepcji obiektów abstrakcyjnych w symulacji wieloagentowej zostanie przedstawiony model ruchu drogowego, przy czym będzie rozpatrywany ruch drogowy na autostradzie w jedną stronę, na dwóch pasach (rys. 2).



Rys. 2. Symulowany system

Źródło: opracowanie własne.

Rozpatrując ruch drogowy, możemy przyjąć, że agentem będzie pojazd (samochód) dowolnego typu wraz z kierowcą [Kesting, Treiber, Helbing 2008, s. 6]. Można to opisać za pomocą pary uporządkowanej:

$$TA = (C, D), \quad (7)$$

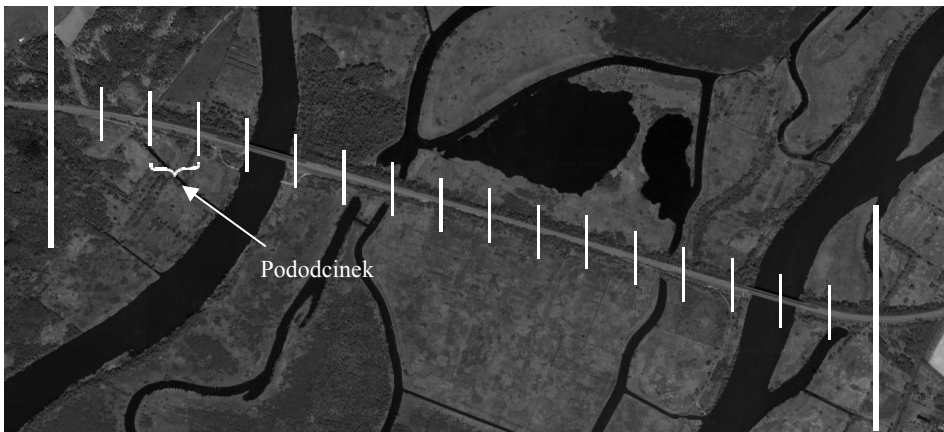
gdzie: C – samochód,
 D – kierowca.

Symulowany fragment autostrady można podzielić na odcinki. Podział na odcinki ma na celu zredukowanie liczby agentów wchodzących w interakcję. Interakcja polega na tym, że zachowanie agenta znajdującego się w pobliżu wpływa na decyzje – akcje podejmowane przez drugiego agenta. Przykładowo założmy, że dwa agenty poruszają się w tym samym kierunku, po tym samym pasie, przy czym drugi jedzie szybciej. Agent poruszający się szybciej po pewnym czasie musi dogonić agenta

¹² Na temat przeciążania operatorów (działań arytmetycznych) między innymi w: [Solter, Kleper 2006, s.140, 236, 328, 473-474; Eckel 2006, s. 113, 213].

jadącego wolniej. W konsekwencji obecność tego pierwszego agenta spowoduje konieczność podjęcia decyzji o zwolnieniu lub wyprzedzaniu. Dzięki podziałowi na odcinki można badać interakcję między agentami tylko w ramach tego samego odcinka i odcinków sąsiednich.

Każdy odcinek jest podzielony na pododcinki (rys. 3). Pododcinki są obszarami, w których agenty pozostają w silnej interakcji. Ponadto, przy każdym pododcinku mogą występować inne obiekty (np. reklamy, znaki drogowe, zjazdy z autostrady, stacje benzynowe itp.), które oddziałują w sposób istotny na uczestników ruchu drogowego. Na rys. 4 pokazano schemat pododcinka z przykładowymi agentami.

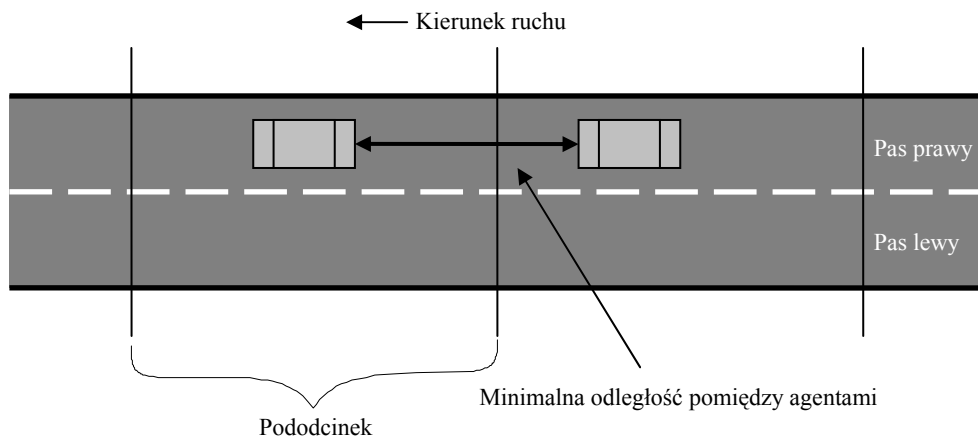


Rys. 3. Podział na pododcinki

Źródło: opracowanie własne.

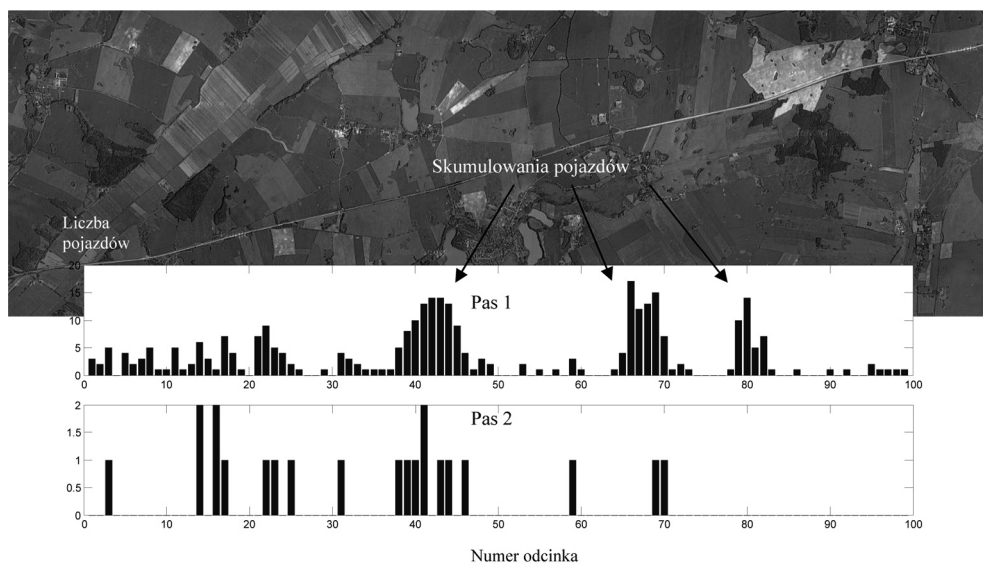
Zasady działania modelowanego systemu, w tym reguły interakcji między agentami są następujące.

1. Agenty pojawiają się na autostradzie z określoną częstotliwością.
2. Prędkość agentów jest losowana zgodnie z przyjętym rozkładem prawdopodobieństwa.
3. Jeżeli agent poruszający się prawym pasem znajdzie się w pododcinku poprzedzającym pododcinek, w którym znajduje się inny agent, poruszający się wolniej, to zmienia pas na lewy, o ile jest wolny.
4. Jeżeli pas lewy jest zajęty, to agent zwalnia do prędkości agenta poprzedzającego, na tak długo, jak długo pas lewy jest zajęty.
5. Agent porusza się tak długo pasem lewym, dopóki pas prawy jest zajęty. Jeżeli jest wolny to zmienia pas na prawy.
6. Wszystkie obliczenia są wykonywane osobno dla każdego agenta, cyklicznie co określoną jednostkę czasu.



Rys. 4. Pododcinek z agentami

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 5. Liczebność agentów w wyodrębnionych odcinkach autostrady

Źródło: opracowanie własne.

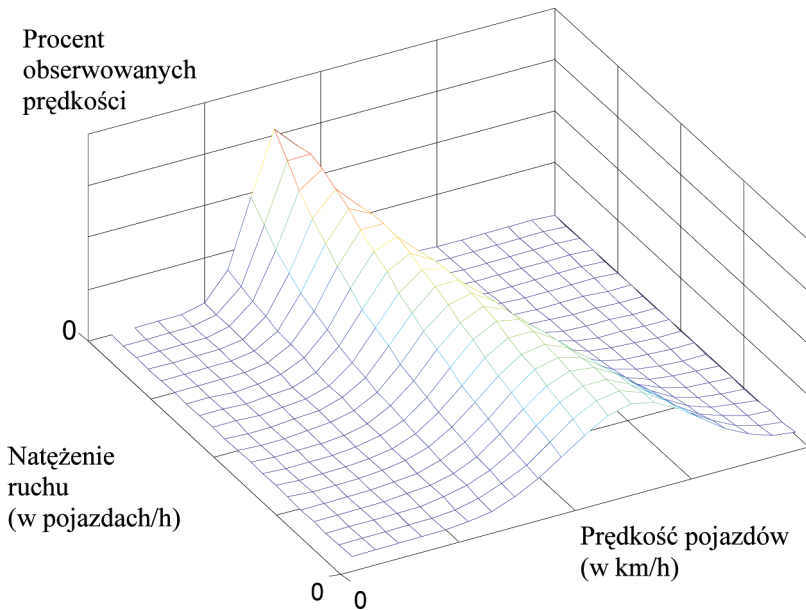
Na omawianym modelu można przeprowadzić praktycznie nieograniczoną liczbę eksperymentów. Wyniki jednego z nich są przedstawione na rys. 5, który pokazuje liczebność agentów w wyodrębnionych odcinkach autostrady, na dwóch pasach ruchu, w danym momencie. Taki obraz uzyskuje się dla każdej chwili symulowanego czasu. Jak widać, na wyodrębnionych odcinkach autostrady, w pewnej odległości

od punktu startu, mamy do czynienia ze skumulowaniem agentów. Są to miejsca, w których pewna liczba agentów czeka na wyprzedzenie jednego lub kilku wolniejszych agentów. Określenie miejsc, w których występują takie skumulowania, może wskazać te odcinki autostrady, które powinny być zmodernizowane (np. przez dobudowanie trzeciego pasa ruchu).

Wyniki eksperymentów symulacyjnych posłużyły do przeprowadzenia walidacji modelu. Walidacja, ogólnie rzecz ujmując, dotyczy sprawdzenia, czy model odzwierciedla i poprawnie reprodukuje zachowania obserwowane w świecie rzeczywistym¹³. M.J. North i Ch.M. Macal [2007, s. 229] wskazują na trzy możliwe sposoby walidacji modelu wieloagentowego:

- poprzez porównanie wyników modelu z systemem rzeczywistym,
- poprzez porównanie wyników modelu z wynikami generowanymi przez inne modele zbudowane dla podobnego systemu,
- poprzez porównanie wyników modelu z wiedzą ekspertów.

Walidację modelu prezentowanego w niniejszym opracowaniu przeprowadzono poprzez porównanie wyników generowanych przez model z wynikami amerykańskich badań ruchu swobodnego pojazdów na drodze¹⁴. Z badań tych wynika, że w



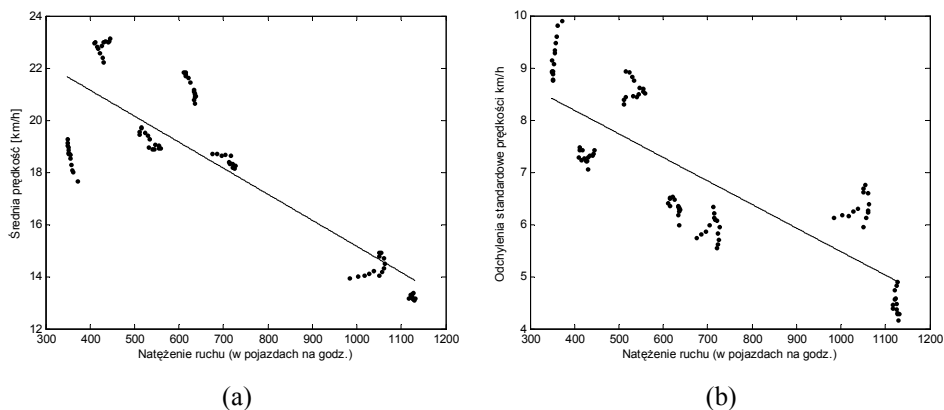
Rys. 6. Zależność między natężeniem ruchu a prędkością pojazdów

Źródło: opracowanie własne na podstawie [Komar, Wołek 1994].

¹³ Więcej na temat walidacji modeli symulacyjnych w: [North, Macal 2007, s. 221-235; Martis 2006, s. 39-46; Hales, Rouchier, Edmonds 2003; Ijeoma, Andersson, Wall 2001].

¹⁴ Wyniki badań przedstawione są w [Komar, Wołek 1994].

miarę wzrostu natężenia ruchu zmniejszają się różnice prędkości pomiędzy pojazdami, a średnia prędkość ruchu wszystkich pojazdów ulega obniżeniu. Zależność tę prezentuje rys. 6. Z rysunku tego wynika ponadto, że w miarę wzrostu natężenia ruchu średnia prędkość pojazdów i odchylenie standardowe prędkości pojazdów maleją. Na takie same zależności wskazują wyniki uzyskane za pomocą prezentowanego modelu (rys. 7), co świadczy o tym, że model jest poprawny.



Rys. 7. Zależność średnich prędkości (a) i odchyłeń standardowych (b) od natężenia ruchu pojazdów

Źródło: opracowanie własne.

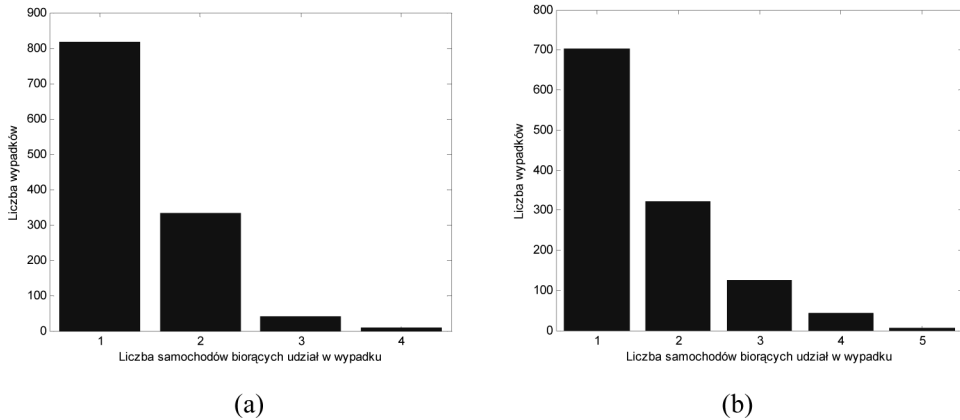
W celu porównania działania modelu z obiektami abstrakcyjnymi i bez nich wprowadzono do modelu element odwzorowujący pojawienie się pewnej niebezpiecznej sytuacji, wymagającej podjęcia przez agenta decyzji o hamowaniu pojazdu (np. nagle wtargnięcie pieszego na drogę). Założono, że kierowca dostrzega tę sytuację z odległości 40 m i rozpoczyna hamowanie, opisane dwoma atrybutami: czasem reakcji kierowcy¹⁵ oraz drogą hamowania¹⁶. W momencie gdy kierowca zaczyna hamować, inni kierowcy w pojazdach jadących za nim również zaczynają hamować.

Za pomocą tak rozbudowanego modelu można uzyskać informację o liczbie agentów (pojazdów z kierowcami) biorących udział w wypadku. Wyniki eksperymentów symulacyjnych zaprezentowano na rys. 8. Wykres (a) przedstawia histogram liczby pojazdów dla symulacji modelu bez obiektów abstrakcyjnych. W tym przypadku każdy agent ma przydzielony czas reakcji i typ samochodu. Wykres (b) natomiast pokazuje wyniki eksperymentu, w którym oba te atrybuty zamieniono na

¹⁵ Czas reakcji został przyjęty jako 1 sekunda, z odchyleniem standardowym wynoszącym 0,25, na podstawie [Bonsall, Liu, Young 2005].

¹⁶ Dane na temat drogi hamowania z podziałem na cztery typy pojazdów zostały zaczerpnięte ze strony internetowej: <http://www.nrma.com.au/keeping-safe-secure/car-safety/car-stopping-distance-tests.shtml>, 22.03.10.

obiekty abstrakcyjne. Typ samochodu zamieniono na trójkę: wartość średnia, pseudoodchylenie standardowe oraz pseudowariancja drogi hamowania dla różnych typów pojazdów. Czas reakcji natomiast – na obiekt abstrakcyjny składający się z wartości średniej, pseudoodchylenia standardowego i pseudowariancji czasu reakcji.



Rys. 8. Histogram liczby samochodów biorących udział w wypadku w symulacji bez obiektów abstrakcyjnych (a) i z obiektami abstrakcyjnymi (b)

Źródło: opracowanie własne.

Jak widać, oba wykresy pokazują zbliżone wyniki, przy czym wykres (b) nawet z większą dokładnością odwzorowuje system rzeczywisty, gdyż bardziej przypomina fragment krzywej Gaussa.

4. Wnioski

W artykule przedstawiono koncepcję użycia obiektów abstrakcyjnych w symulacji wieloagentowej na przykładzie prostego systemu ruchu drogowego, ale może być ona zastosowana również w symulacji innych systemów wieloagentowych, np. systemów społecznych, takich jak miasto, gospodarstwa domowe, konsumenci w hipermarketach.

Użycie obiektów abstrakcyjnych w wieloagentowej symulacji daje możliwość wykonywania działań arytmetycznych na czynnikach losowych. Dzięki temu można wykonywać operacje na danych statystycznych opisanych rozkładem, tzn. można dodawać i odejmować odchylenia standardowe czy też wariacje zgodnie z regułami algebry. W konsekwencji pozwala to na lepsze odzwierciedlenie zachowania się systemu wieloagentowego.

Istotną zaletą zastosowania obiektów abstrakcyjnych w symulacji wieloagentowej jest skrócenie czasu obliczeń, gdyż komponent z obiektem abstrakcyjnym zastępuje

całą grupę agentów określonego typu. Ponadto w symulacji z obiektami abstrakcyjnymi można wyliczyć prawdopodobieństwo wystąpienia określonych typów zachowań agentów na podstawie tylko jednego symulowanego zdarzenia, podczas gdy w klasycznej symulacji wiąże się to z koniecznością symulowania wielu zdarzeń.

Literatura

- Amigoni F., Schiaffonati V., *Multiagent-based simulation in biology – a critical analysis*, „Studies in Computational Intelligence” 2007, no. 64, s. 179-191.
- Avila A. i in., *A complete simulator architecture for inter-vehicle communication based intersection warning systems*, [w:] Proceedings 8th Int. IEEE Conf. Intelligent Transportation Systems, Vienna 2005.
- Barber K.S. i in., *Sensible agent problem-solving simulation for manufacturing environments*, [w:] Proceedings of the Artificial Intelligence and Manufacturing Workshop 1998, <http://www.aaai.org/Papers/SIGMAN/1998/SIGMAN98-001.pdf>.
- Beuck, U., Rieser M., Nagel K., *Multi-agent simulation used in a real world scenario on environmentally-oriented road pricing schemes*, [w:] 53rd Annual North American Meetings of the Regional Science Association International, Toronto, November 2006, svn.vsp.tu-berlin.de/repos/public-svn/publications/vspwp/2006/06-17/18Nov06PaperNARSC2006_Beuck_etal.pdf.
- Bieniasz S., *Techniki symulacji agentowej w zastosowaniu do badania procesów cieplnych*, praca doktorska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki, AGH, Kraków 2006, winntbg.bg.agh.edu.pl/rozprawy/9711/full9711.pdf.
- Bonabeau E., *Agent-based modeling, Methods and techniques for simulating human systems*, [w:] Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, vol. 99 Suppl. 3 (14 May 2002), s. 7280-7287, <http://www.pnas.org/content/99/suppl.3/7280.full>.
- Bonsall P., Liu R., Young W., *Modelling safety-related driving behaviour-impact of parameter values*, „Transportation Research Part A: Policy and Practice” 2005, vol. 39(5), s. 425-444.
- Borawski M., *Pseudorozkład jako uogólnienie pojęcia rozkładu*, „Przegląd Statystyczny” 2008, vol. 55, no. 3, s. 71-85.
- Bourjot Ch., Chevrier V., *Multi-agent simulation in biology, Application to social spiders case*, [w:] *Agent based simulation*, Passau 2001, <http://www.loria.fr/~bourjot/ABS-PASSAU01.pdf>.
- Casti J. *Would-be worlds, how simulation is changing the world of science*, Wiley, New York 1997.
- Cicortas A., Somosi N., *Multi-agent system model for urban traffic simulation*, [w:] 2nd Romanian-Hungarian Joint Symposium on Applied Computational Intelligence, Timisoara, Romania, May 12-14, 2005, bmf.hu/conferences/saci2005/Cico.pdf.
- Davidsson P., *Multi agent based simulation, Beyond social simulation*, [w:] S. Moss, P. Davidsson (eds.), *Multi Agent Based Simulation*, LNCS series, vol. 1979, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg 2000, www.ide.hk-r.se/~pdv/Papers/MABS2000.pdf.
- Dávila J., Tucci K., *Towards a logic-based, multi-agent simulation theory*, [w:] International Conference on Modeling, Simulation and Neural Networks MSNN'2000, IEEE, ches.ing.ula.ve/INVESTIGACION/ARTICULOS/JACINTO/MSNN-JDKT00.pdf.
- Dávila J., Uzcátegui M., Tucci K., *A Multi-agent theory for simulation*, [w:] G. Tonella (ed.), Proceedings of the Fifth International Conference on Modelling, Simulation and Optimization (MSO2005), The International Association of Science and Technology for Development (IASTED), Anaheim 2005, s. 285-290, www.geog.unt.edu/biocomplexity/d/davila-etal.pdf.
- Dimou Ch. i in., *A multi-agent simulation framework for spiders traversing the SemanticWeb*, [w:] IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence (WI 2006), Hong Kong, Decem-

- ber 18-22, 2006, http://issel.ee.auth.gr/ktree/Documents/Root%20Folder/ISSEL/Publications/WI2006_BioSpider.pdf.
- Dresner K., Stone, P., *Multiagent traffic management. An improved intersection control mechanism*, [w:] *The Forth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 05)*, s. 471-477, Utrecht 2005.
- Drogoul A., Ferber J., *Multi-agent simulation as a tool for modeling societies, application to social differentiation in ant colonies*, Lecture Notes In Computer Science 1992, vol. 830. Selected papers from the 4th European Workshop on on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World, Artificial Social Systems Springer-Verlag 1992, s. 3-23.
- Eckel B., *Thinking in JAV*, edycja polska, Helion, Gliwice 2006.
- Eichler S. i in., *Simulation of car-to-car messaging, analyzing the impact on road traffic* [w:] Proc. of the 13th IEEE Int. Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems, 27-29 Sept. 2005, s. 507-510.
- El Hadouajl S., Espiel S., Drogoul A., *A multi-agent road traffic simulation model, validation of the insertion case*. „Simulation Series” 2004, vol. 36; part 4, s. 20-25, <http://www.scs.org/scsarchive/getDoc.cfm?id=2710>.
- Epstein J.M., Axtell R., *Growing artificial societies. Social Science from the bottom up*. MIT Press, Cambridge 1996.
- Federici M.L., Redaelli S., Vizzari G., *Models, abstractions and phases in multi-agent based simulation*, [w:] F. De Paoli i in. (eds.), *Proceedings of the 7th WOA 2006 Workshop from Objects to Agents*, Catania 2006, <ftp.informatik.rwth-aachen.de/Publications/CEUR-WS/Vol-204/P15.pdf>.
- Ferber J., *Multi-Agent Systems. An Introduction to Distributed Artificial Intelligence*, Addison-Wesley 1999.
- Fernandes P., Nunes U., *Multi-agent architecture for simulation of traffic with communications*, [w:] *ICINCO 2008 – International Conference on Informatics in Control, Automation & Robotics*, Funchal, May 2008, http://www.isr.uc.pt/~pedro/08_ICINCO2008_Pedro.pdf.
- Findeisen W. (red.), *Analiza systemowa – podstawy i metodologia*, PWN, Warszawa 1985.
- Fishman G.S., *Symulacja komputerowa. Pojęcia i metody*, PWE, Warszawa 1981.
- Frank A.U., Bittner S., Raubal M., *Spatial and cognitive simulation with multi-agent systems*, [w:] D.R. Montello (ed.), *Spatial Information Theory – Foundations of Geographic Information Science*, Springer Verlag, Berlin – Heidelberg 2001, s. 124-139, <ftp://ftp.geoinfo.tuwien.ac.at/frank/af-cosit01-CognizingAgents.pdf>.
- Gilbert N., Troitzsch K. G., *Simulation for the Social Scientist*, McGraw-Hill International, 2005.
- Gonçalves A.S., Rodrigues A., Correia L., *Multi-agent simulation within geographic information systems*, [w:] H. Coelho, B. Espinasse (eds.), *Proceedings of the 5th Workshop on agent-Based Simulation. SCS-The Society for Modeling and Simulation International*, 2004, www.dha.lnec.pt/nti/pdf/AGoncalvesetal_ABS2004.pdf.
- Gordon G., *Symulacja systemów*, WNT, Warszawa 1974.
- Hales D., Rouchier J., Edmonds B., *Model to-Model Analysis*, „Journal of Artificial Societies and Social Simulation” 2003, no. 6(4).
- Hallé S., Laumonier J., Chaib-draa B., *A decentralized approach to collaborative driving coordination*, [w:] IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, Washington, D.C. 2004.
- Ijeoma S.I., Andersson J., Wall A., *Correctness criteria for models’ validation—A philosophical perspective*, Department of Computer Science and Computer Engineering (IDT), Malardalen University 2001, <www.mrtc.mdh.se/publications/0731.pdf>.
- Kesting A., Treiber M., Helbing D., *Agents for traffic simulation*, arXiv,0805.0300v1 [physics.soc-ph] 2008, <http://arxiv.org/abs/0805.0300>.
- Komar Z., Wolek C., *Inżynieria ruchu drogowego. Wybrane zagadnienia*, Politechnika Wrocławska, Wrocław 1994.
- Latuszyńska M., *Symulacja komputerowa dynamiki systemów*, PWSZ, Gorzów Wielkopolski 2008.

- Li Z., Wang F., Miao Q., He F., *An urban traffic control system based on mobile multi-agent*, [w:] Proc. of IEEE Int. Conference on Vehicular Electronics and Safety, Shanghai 2006.
- Macal Ch.M., North M.J., *Tutorial on agent-based modeling and simulation, Part 2. How to model with agent*, [w:] L. F. Perrone i in. (eds.), *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference, WSC'2006*, Monterey, California 2006, s. 73-83, www.informs-sim.org/wsc06papers/008.pdf.
- Martis M.S., *Validation of simulation based models: A theoretical outlook*, „The Electronic Journal of Business Research Methods” 2006, vol. 4 issue 1, s. 39-46, www.ejbrm.com.
- North M.J., Macal Ch.M., *Managing Business Complexity. Discovering Strategic Solutions with Agent-Based Modeling and Simulation*, Oxford University Press, New York 2007.
- Pan X. i in., *A Multi-agent based framework for the simulation of human and social behaviors during emergency evacuations*, „AI & Society” 2007, vol. 22, no. 2, Springer, London 2007, s. 113-132, <http://www.springerlink.com/content/p260115756537528/>.
- Siebers P.O. i in., *An agent-based simulation of in-store customer experiences*, [w:] Proceedings of the 2008, Operational Research Society Simulation Workshop, s. 25-41, 1-2 April 2008, Worcester-shire, UK, <http://eprints.nottingham.ac.uk/993/>.
- Siebers P.O. i in., *A multi-agent simulation of retail management practices*, [w:] *Proceedings of the Summer Computer Simulation Conference*, July 15-18, 2007, San Diego, USA, s. 959-966.
- Siebers P.O., Aickelin U., *Introduction to multi-agent simulation*, [w:] F. Adam, P. Humphreys (eds.), *Encyclopedia of Decision Making and Decision Support Technologies*, Idea Group Publishing, Pennsylvania 2008, s. 554-564, <http://www.cs.nott.ac.uk/~pos/docs/pos-DMDST-ABS-2008.pdf>.
- Situngkir H., Surya Y., *Agent-based model construction in financial economic system*, 2004, <http://cogprints.org/3767/>.
- Solter N.A., Kleper S.J.: *C++ zaawansowane programowanie*, Helion, Gliwice 2006.
- Tornquist, J., Davidsson, P., *A multi-agent system approach to train delay handling*, [w:] Proceedings from Agent Technologies in Logistics workshop. The 15th European Conference on Artificial Intelligence, Lyon, France 2002, www.ipd.bth.se/jtr/TornquistDavidsson_2002.pdf.
- Vogel A., Nagel K., *Multi-agent based simulation on individual traffic in Berlin*, [w:] Proceedings of the Int. Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management (CUPUM'05), London 2005.
- Wooldridge M.J., *An introduction to multi-agent systems*, Wiley, New York 2002.
- Wooldridge M., *Intelligent agents*, [w:] G. Weiss (ed.), *Multiagent Systems – A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*, MIT Press, Cambridge 1999.
- Zeigler B.P., *Teoria modelowania i symulacji*, PWE, Warszawa 1984.

APPLICATION OF ABSTRACT OBJECTS IN MULTI-AGENT COMPUTER SIMULATION

Summary: The paper introduces the idea of abstract objects in the context of its possible applications in multi-agent simulation for reproducing agents' behaviour dependent on random factors. In addition, a multi-agent model of traffic with the implementation of abstract objects idea is presented. The results of simulation of conducted experiments justify the usefulness of the shown concept.